

УДК 621.384.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙКИ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ ПУТЕМ АНАЛИЗА ИЗЛУЧЕНИЯ В ИХ БЛИЖНЕМ ПОЛЕ

© 2022 г. А. Н. Апарников^а, *, Е. В. Бурый^а, Н. Е. Орлов^а, В. Д. Шашурин^а

^аМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет), Москва, 105005 Россия

*e-mail: alexander.aparnikov@gmail.com

Поступила в редакцию 14.07.2021 г.

После доработки 17.09.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

Экспериментально получено пространственное распределение интенсивности излучения в ближнем поле линейки лазерных диодов с длиной волны 808 нм. Во время экспериментов лазерные диоды работали в квазинепрерывном режиме генерации в диапазоне токов инжекции от порогового значения до наступления деградации отдельных лазерных диодов. На основании выполненного анализа распределения интенсивности излучения в ближнем поле в направлении, параллельном эпитаксиальным слоям, предложена система параметров, позволяющих получать вероятностную оценку предельного значения тока инжекции отдельных диодов. При оптическом контроле поверхности лазерных диодов установлено, что отказ отдельных диодов в большинстве случаев наступал вследствие катастрофической оптической деградации полупрозрачного зеркала лазерного резонатора, сформированного на сколотой поверхности полупроводника. Предложенная система параметров включает как ранее известные, так и новые: отношение максимального и среднего значений интенсивности лазерных диодов в пространственном распределении, среднеквадратичное отклонение интенсивности и параметр, учитывающий интенсивность излучения краевых лазерных диодов. В результате анализа пространственного распределения интенсивности излучения в ближнем поле линейки лазерных диодов на рабочем участке ватт-амперной характеристики можно выделить отдельные лазерные диоды, характеризующиеся наименьшим предельным током инжекции и предсказать развитие деградационных процессов.

Ключевые слова: линейка лазерных диодов, ближнее поле, катастрофическая оптическая деградация, распределение интенсивности излучения, неоднородность, прогноз деградации.

DOI: 10.31857/S102809602206005X

ВВЕДЕНИЕ

Современные мощные лазерные диоды — коммерчески востребованный продукт, они широко применяются в системах телекоммуникаций, для обработки материалов, накачки активных сред твердотельных лазеров, в научных исследованиях [1, 2]. Как правило, предъявляются высокие требования к основным эксплуатационным характеристикам этих полупроводниковых приборов: мощности излучения, коэффициенту электрооптического преобразования, ресурсу работы. Ресурс работы современных лазерных диодов и линеек лазерных диодов квазинепрерывного режима генерации обычно составляет свыше 10^9 импульсов, что для типовых значений частоты импульсов тока инжекции эквивалентно 12–15 тыс. часов непрерывной работы [1, 3, 4]. Для повышения эксплуатационных характеристик мощных лазерных диодов как в России, так и за рубежом ведут-

ся работы по модернизации конструкций активного элемента и технологических процессов их изготовления.

Известно, что явление катастрофической оптической деградации полупрозрачного зеркала лазерного резонатора ограничивает предельное значение оптической мощности излучения лазерных диодов квазинепрерывного режима генерации и снижает ресурс их работы [2, 5, 6]. Существующие методы анализа катастрофической оптической деградации либо разрушающие, либо характеризуются значительной погрешностью прогнозирования момента наступления этого явления [2]. Неоднородность распределения интенсивности ближнего поля излучения в направлении, параллельном эпитаксиальным слоям диода, может свидетельствовать о приближении момента выхода лазерного диода из строя [7–9]. В [7] для оценки предельного значения тока инжекции

одиноким лазерным диодом с длиной волны излучения 940 нм было предложено использовать параметр количественной оценки неоднородности этого распределения, названный “пиковой плотностью мощности излучения” и показывающий как наличие, так и преобладание в распределении локального экстремума. Наличие экстремума свидетельствует о локальном увеличении плотности мощности излучения, и, как следствие, температуры материала. Локальный рост температуры, в свою очередь, является основным катализатором запуска процесса катастрофической оптической деградации: для ее возникновения приповерхностная область передней грани лазерного диода должна достигнуть температуры 100–150°C [2, 10, 12, 13].

Практический интерес представляет оценка предельных характеристик линейки лазерных диодов — одномерного массива лазерных диодов, включенных в цепь параллельно и формирующих интегральную схему. Использование лишь одного параметра для такой оценки может давать некорректные результаты из-за влияния друг на друга отдельных лазерных диодов в составе линейки, а также из-за неравенства условий теплоотведения между крайними и центральными диодами [5, 14]. Создание новой системы параметров позволило проводить вероятностную оценку предельных эксплуатационных параметров отдельных лазерных диодов в составе линейки на основании данных распределений интенсивности ближнего поля излучения в направлении, параллельном эпитаксиальным слоям диода.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Ближнее поле излучения линейки лазерных диодов регистрировали на лабораторном стенде, обеспечивающего поддержание установленной температуры основания линейки лазерных диодов с погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$ и регистрацию распределения интенсивности в прямоугольной области размером 7.0×0.01 мм. Особенностью примененной в составе стенда промышленной телевизионной камеры с монохромной светочувствительной матрицей является малое время экспозиции, что позволяет регистрировать распределение интенсивности в пределах действия импульса тока инжекции длительностью около 200 мкс.

Исследуемые образцы линейки лазерных диодов были изготовлены на основе системы материалов AlGaAs/GaAs с квантово-размерной активной областью и длиной волны излучения 808 нм. В состав линейки входили 19 лазерных диодов. Монтаж линейки на медный теплоотвод был выполнен с помощью тугоплавкого припоя AuSn и термокомпенсатора CuW.

Импульсы тока инжекции линейки лазерных диодов формировались генератором “СВЕТИНФО-И” [15]. Светочувствительная матрица телевизионной камеры, снабженная объективом, была установлена перед излучающей поверхностью линейки лазерных диодов на расстоянии 50 мм. Синхронизацию моментов регистрации излучения и формирования импульсов тока инжекции обеспечивал оптический триггер. Разработанное программное обеспечение позволяло задавать границы и шаг тока инжекции.

Сценарий эксперимента был следующим: после установления теплового равновесия на линейку лазерных диодов подавали импульсы тока инжекции и регистрировали распределение интенсивности лазерного излучения I_{LD} . Амплитуда импульсов тока инжекции увеличивалась, начиная с порогового значения до деградации последнего лазерного диода в составе линейки, после чего поверхность ее передней грани анализировали на предмет наличия катастрофической оптической деградации с применением оптического микроскопа с 200-кратным увеличением.

Перед каждым повышением тока проверяли достижение теплового баланса между термостабилизатором и медным основанием линейки лазерных диодов. При длительности импульсов тока 200 мкс, частоте их следования 20 Гц и увеличении тока инжекции на 1 А тепловой баланс достигался не позднее, чем после десятого импульса тока.

Для количественной оценки неоднородности распределения интенсивности были использованы следующие параметры (рис. 1): пиковая плотность интенсивности I_{PEAK} [7], являющаяся отношением интегральной интенсивности лазерного диода к площади его излучающей области и учи-

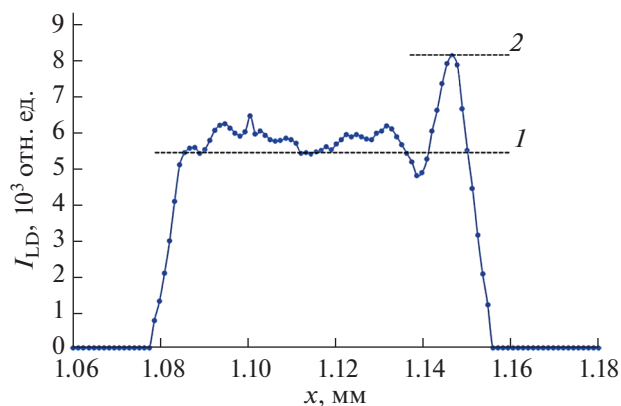


Рис. 1. Распределение интенсивности излучения в ближнем поле лазерного диода I_{LD} в зависимости от расстояния от начала линейки x . Цифрами обозначены среднее I_{MEAN} (1) и максимальное I_{MAX} (2) значения интенсивности.

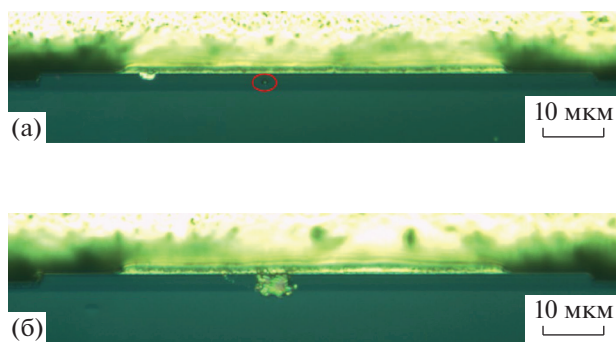


Рис. 2. Изображения основных дефектов на поверхности передней грани лазерного диода: признак катастрофической оптической деградации (а); загрязнение на поверхности (б).

тывающая наличие локального экстремума интенсивности; отношение $I_{\text{MAX-to-MEAN}}$ максимальной интенсивности I_{MAX} к среднему значению I_{MEAN} в распределении; среднеквадратичное отклонение интенсивности излучения I_{STD} .

Для учета неравенства условий теплоотведения центральных и краевых лазерных диодов [13, 16] было предложено считать краевыми три лазерных диода с каждой стороны линейки. Для проведения эксперимента использовали идентичные образцы линейки лазерных диодов, обозначенные как “А-1” и “А-2”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При осмотре образцов линейки лазерных диодов после деградации под микроскопом на перед-

ней грани большинства диодов (у 35 из 38 диодов двух образцов соответственно) были обнаружены темные пятна в области эпитаксиальных слоев, свидетельствующие о катастрофической оптической деградации [4, 9, 17] (рис. 2а). Расположение темных пятен совпадает с пространственными положениями максимальных интенсивностей излучения в ближнем поле отдельных лазерных диодов, входящих в линейку (рис. 3).

Также на некоторых лазерных диодах были обнаружены загрязнения, возникшие, предположительно, при транспортировке и монтаже образцов (рис. 2б). Заметим, что наличие даже небольших загрязнений на поверхности передней грани в окрестности активной области может приводить к локальному увеличению температуры и снижению предельного тока инжекции лазерного диода.

Для выполнения сравнительного анализа образцов интегральные интенсивности были нормированы на максимальное значение интенсивности излучения, достигнутое в ходе эксперимента (рис. 4). Символами “×” обозначены величины тока инжекции, при которых наблюдались признаки деградации лазерного диода. Большая часть таких событий происходит при токе инжекции, превышающем рабочее значение ($I_{\text{WP}} = 30 \text{ A}$) не менее чем в два раза.

Как правило, критерием отказа линейки лазерных диодов считается снижение оптической мощности излучения на 20% при постоянном уровне тока инжекции [4, 18, 19]. Для исследованных линеек это эквивалентно выходу из строя трех–четырех лазерных диодов. Чтобы установить предельную величину тока инжекции, не

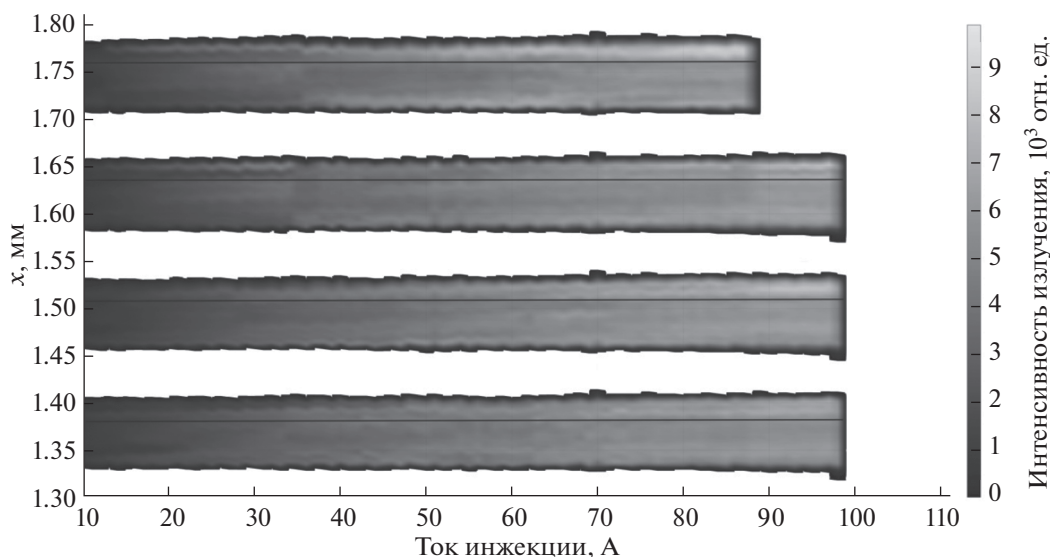


Рис. 3. Зарегистрированные в ближнем поле плоскости слоев диода пространственные распределения интенсивностей излучения отдельных лазерных диодов, входящих в линейку. Центры областей катастрофической оптической деградации на передней грани лазерного диода изображены линиями черного цвета.

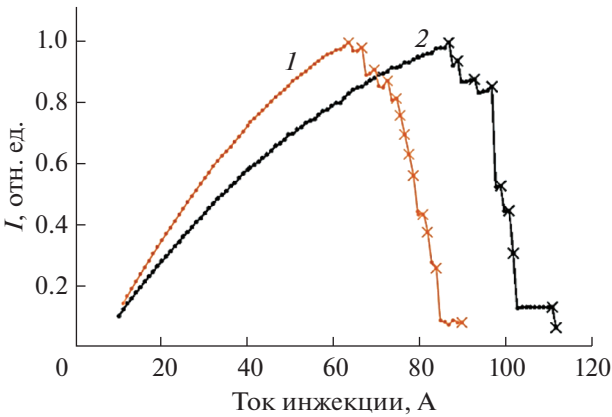


Рис. 4. Нормированные зависимости интегральной интенсивности I излучения образцов А-1 (1) и А-2 (2) линеек лазерных диодов от тока инжекции. Символами “x” обозначены величины тока инжекции, при которых зарегистрирована деградация отдельных лазерных диодов.

приводящую к деградации такого числа лазерных диодов, необходимо выявить отличия ватт-амперных характеристик в их ближнем поле.

Параметры неоднородности излучения в ближнем поле были оценены на линейном участке ватт-амперной характеристики от значения 10 А до удвоенного рабочего тока 60 А. Все лазерные диоды делили на три группы по полученным значениям параметров I_{PEAK} и I_{STD} . Дополнительно отмечали те лазерные диоды, у которых параметр $I_{MAX-to-MEAN}$ превышал среднее значение, полученное для всех лазерных диодов одной линейки, и среднеквадратичное отклонение этого параметра.

Для всех лазерных диодов каждого образца были определены совокупности параметров неоднородности распределения интенсивности из-

лучения в ближнем поле. В табл. 1 представлены параметры тех лазерных диодов, которые деградировали раньше других и стали причиной отказа всей линейки (в соответствии с указанным выше критерием).

Лазерные диоды, отмеченные по параметру $I_{MAX-to-MEAN}$ совместно с высоким значением I_{STD} и средними показателями I_{PEAK} , подвержены ранней деградации с вероятностью P_{ED} , которая составляет 100% для основных лазерных диодов и 66% для краевых. Для краевых лазерных диодов, не выделенных по значению параметра $I_{MAX-to-MEAN}$, потенциальным признаком ранней деградации можно считать низкие значения I_{PEAK} и I_{STD} . Вероятность P_{ED} для этих лазерных диодов составила 25%.

Дополнительное внимание следует уделять основным лазерным диодам, обладающим одинаковыми средними значениями I_{PEAK} и I_{STD} , одинаковыми высокими значениями I_{PEAK} и I_{STD} и выделяющихся величиной параметра $I_{MAX-to-MEAN}$. Вероятность правильного определения лазерных диодов, у которых возникала катастрофическая оптическая деградация, составила 33 и 25% соответственно.

Заметим, что образование в процессе катастрофической оптической деградации шунтирующего электропроводящего канала [18] может снижать ток инжекции, протекающий в соседних лазерных диодах и, как следствие, увеличивать их предельный ток инжекции. Данный эффект в ряде случаев оказывает негативное влияние на вероятность определения лазерных диодов с низким предельным током инжекции при одинаковых параметрах двух или трех соседних лазерных диодов.

Таблица 1. Параметры неоднородности распределения интенсивности излучения в ближнем поле лазерных диодов, являющиеся причиной отказа линейки лазерных диодов

Номер выделенной совокупности параметров	Число лазерных диодов, соответствующих совокупности параметров		Группа (по величине I_{PEAK})	Признак (по величине $I_{MAX-to-MEAN}$)	Группа (по величине I_{STD})	Признак (лазерный диод краевой)	$P_{PD}, \%$
	образец “А-1”	образец “А-2”					
1	2	2	1	Нет	1	Да	25
2	2	2	3	Да	3	Нет	25
3	1	0	2	Да	3	Нет	100
4	1	2	2	Нет	2	Нет	33
5	1	2	2	Да	3	Да	66

Таким образом, анализ интенсивностей излучения в ближнем поле лазерных диодов на рабочем участке ватт-амперной характеристики позволяет формировать систему количественных оценок параметров работы диодов, в результате становится возможным прогнозирование ранней деградации отдельно взятых лазерных диодов линейки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально доказано, что предложенные совокупности рабочих параметров формируют количественную оценку, связанную с характером распределения интенсивности излучения в ближнем поле лазерного диода в направлении, параллельном эпитаксиальным слоям, на основании которой можно предсказывать предельный ток инжекции, соответствующий моменту деградации этого лазерного диода, с вероятностью от 20 до 100%.

Описанная система параметров может стать основой метода получения неразрушающей вероятностной оценки предельных характеристик и ресурса работы отдельных лазерных диодов, линеек и решеток лазерных диодов квазинепрерывного режима генерации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить сотрудников АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха» С.М. Сапожникова и А.И. Данилова за представленную возможность проведения экспериментов со специально изготовленными образцами и плодотворное обсуждение полученных результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. An H., Jiang J., Xiong Y., Inyang A., Qiang Zhang, Lewin A., Strohmaier S., Treusch G. // Proc. SPIE. 2013. V. 8605. P. 86050U. <https://doi.org/10.1117/12.2004979>
2. Zhang Q., Xiong Y., An H., Boucke K., Treusch G. // Sci. Rep. 2016. V. 6. № 19011. P. 1. <https://doi.org/10.1038/srep19011>
3. Fassbender W., Kissel H., Lotz J., Koenning T., Patterson S., Biesenbach J. // Proc. SPIE. 2017. V. 10085. P. 1008509. <https://doi.org/10.1117/12.2253837>
4. Yagi T., Mitsuyama H., Nishida T., Kadoiwa K., Kuramoto K. // Proc. SPIE. 2014. V. 8965. P. 896502. <https://doi.org/10.1117/12.2037110>
5. Tomm J.W., Ziegler M., Hempel M., Elsaesser T. // Laser Photonics Rev. 2011. V. 5. № 3. P. 422. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000023>
6. Sin Y., Lingley Z., Ayvazian T., Brodie M., Ives N. // Proc. SPIE. 2018. V. 10553. P. 105531E. <https://doi.org/10.1117/12.2287288>
7. Leonhäuser B., Kissel H., Unger A., Köhler B., Biesenbach J. // Proc. SPIE. 2014. V. 8965. P. 896506. <https://doi.org/10.1117/12.2039153>
8. Leisher P.O., Li C., Jha A.K., Pipe K.P., Helmrich J., Thiagarajan J., Boisselle M.C., Patra S.K., Sezgin S., Deri R.J. // IEEE J. Quantum Electr. 2018. V. 54. № 6. P. 1. <https://doi.org/10.1109/JQE.2018.2873073>
9. Hempel M., Tomm J.W., Baeumler M., Konstanzer H., Mukherjee J., Elsaesser T. // Proc. SPIE. 2013. V. 8432. P. 84320O. <https://doi.org/10.1117/12.922395>
10. Hempel M., Tomm J.W., Mattina F.L., Ratschinski I., Schade M., Shorubalko I., Stiefel M., Leipner H.S., Kiesling F.M., Elsaesser T. // IEEE J. Quantum Electr. 2013. V. 19. № 4. P. 1. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2012.2236303>
11. Zhang H., Fan Y., Liu H., Wang J., Zah C., Liu X. // Proc. SPIE. 2017. V. 10123. P. 10123E. <https://doi.org/10.1117/12.2256074>
12. Epperlein P.W. Semiconductor Laser Engineering, Reliability and Diagnostics: A Practical Approach to High Power and Single Mode Devices. John Wiley & Sons, 2013. 496 p.
13. Hempel M., Tomm J.W. // Proc. SPIE. 2014. V. 9002. P. 90021H. <https://doi.org/10.1117/12.2035488>
14. Rehioui O., Bechou L., Fillardet T., Kohl A., Ousten Y., Volluet G. // Proc. SPIE. 2010. V. 7583. P. 758314. <https://doi.org/10.1117/12.840671>
15. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лаборатория лазерных информационных систем (2021). Россия, Москва. <http://llis.bmstu.ru>. Дата обращения 20 мая 2021.
16. Aparnikov A.N., Buryi E.V., Orlov N.E. // Optoelectr. Instrum. Data Process. 2019. V. 55. P. 574. <https://doi.org/10.3103/S8756699019060062>
17. Tomm J.W., Hempel M., Mattina F.L., Kiesling F.M., Elsaesser T. // Proc. SPIE. 2013. V. 8640. P. 86401F. <https://doi.org/10.1117/12.2003465>
18. Miftakhutdinov D.R., Bogatov A.P., Drakin A.E. // Quantum Electr. 2010. V. 40. № 7. P. 589. <https://doi.org/10.1070/QE2010v040n07ABEH014339>
19. Kanskar M., Bao L., Bai J., Chen Z., Dahlen D., DeVito M., Dong W., Grimshaw M., Haden J., Guan X., Hemenway M., Kennedy K., Martinsen R., Tibbals J., Urbanek W., Zhang S. // Proc. SPIE. 2014. V. 8965. P. 896508. <https://doi.org/10.1117/12.2040851>

Determination of the Limiting Characteristics of a Laser Diode Bar by Analyzing Radiation in the Near Field

A. N. Aparnikov^{1, *}, E. V. Buryi¹, N. E. Orlov¹, V. D. Shashurin¹

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia*

**e-mail: alexander.aparnikov@gmail.com*

The spatial distribution of the radiation intensity in the near field of a laser diode bar with a wavelength of 808 nm is obtained experimentally. During the experiments, the laser diodes operate in a quasi-continuous lasing regime in the range of injection currents from the threshold value to the onset of degradation of individual laser diodes. On the basis of the analysis of the distribution of the radiation intensity in the near field in the direction parallel to epitaxial layers, a system of parameters is proposed that makes it possible to obtain a probabilistic estimate of the limiting value of the injection current of individual diodes. During optical inspection of the surface of laser diodes, it is found that the failure of individual diodes in most cases occurs due to catastrophic optical degradation of the semitransparent mirror of the laser resonator formed on the semiconductor cleaved surface. The proposed system of parameters includes both previously known and new ones: the ratio of the maximum and average values of the intensity of laser diodes in the spatial distribution, the standard deviation of the intensity, and a parameter that takes into account the radiation intensity of edge laser diodes. As a result of the analysis of the spatial distribution of the radiation intensity in the near field of a laser diode bar in the working section of the watt-ampere characteristic, it is possible to single out individual laser diodes characterized by the lowest limiting injection current and to predict the development of degradation processes.

Keywords: laser diode bar, near field, catastrophic optical damage, intensity distribution, nonuniformity, degradation prediction.